第46卷 第5期
2023年5月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 5
May 2023

黄土丘陵区带状柠条锦鸡儿林地深层土壤干化及根系分布

于晓燕[1]， 汪 星[1]， 吕 雯[2,3]， 高元亢[1]， 王永强[1]， 王雁超[1]

（1. 宁夏大学农学院，宁夏 银川 750021；2. 宁夏大学生态环境学院，宁夏 银川 750021；
3. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室，宁夏 银川 750021）

摘 要：针对黄土丘陵区带状柠条锦鸡儿人工林地根系、土壤水分特征及深层土壤干化研究薄弱问题，以宁夏南部山区20 a雨养带状人工柠条锦鸡儿林地为研究对象，选取相似的旱作农田为对照，对0~1000 cm深度土壤水分、柠条锦鸡儿根系垂直分布及其相关性进行分析。结果表明：（1）20 a人工柠条锦鸡儿林地0~1000 cm深度土壤干化，柠条锦鸡儿林地带内和带间土壤水分含量低于农田；0~1000 cm土层带内土壤水分含量较带间降低1.46%。（2）在300~1000 cm土层范围内，20 a人工柠条锦鸡儿林地出现了不同的亏缺程度与干燥化程度，带间、带内水分有效性分别为0.21和0.02，供水系数平均值分别为0.49和0.33。（3）柠条锦鸡儿林地根系主要集中在0~80 cm土层，0~80 cm土层带间、带内根干重分别占总根重的46.33%和45.56%，根表面积密度分别占总根表面积密度的66.58%和63.51%，根长密度分别占总根长密度的59.54%和58.45%。该研究对于深入了解半干旱黄土区人工柠条锦鸡儿林地根系、水分具有积极意义。

关 键 词：柠条锦鸡儿林地；土壤水分有效性；土壤干燥化程度；根系分布

文章编号：1000－6060(2023)05－0753－10(0753～0762)

水分因子是半干旱黄河流域生态保护与高质量发展的一个重要组成部分[1-2]。深层水分作为植物可长期利用的水库，在植物应对长期干旱等极端气候中起着至关重要的作用[3]。根系的形态和分布特征直接反映植被对土地的利用情况及土壤物质能量被利用吸收的可能性和生产力，对植被的生长具有决定性作用[4-5]。宁夏南部山区属于典型的黄土丘陵区，柠条锦鸡儿既是当地主要的水土保持植物，也是良好的饲用灌木，高密度带状栽植是宁夏人工柠条锦鸡儿林独特的栽植模式。梁海斌等[6]研究表明不同林龄柠条锦鸡儿林地土壤水分含量总体表现为：撂荒地>10 a柠条锦鸡儿林>20 a柠条锦鸡儿林>35 a柠条锦鸡儿林；刘增文等[7]又将土壤凋萎湿度和田间持水量之间的有效水分分为难效水、中效水和易效水3个等级；也有学者通过构建土壤水分相对亏缺指数，发现不同植被土壤亏缺程度有差异[8-9]；王志强等[10]研究表明7 a林龄人工紫花苜蓿草地、23 a林龄人工柠条锦鸡儿灌木林和人工油松林的耗水深度分别达到1550 cm、2240 cm和2150 cm。沙地人工小叶柠条锦鸡儿植被根系分布对土壤水分具有显著影响，吸收根集中分布区域下层土壤水分含量锐减[11]；张喜英等[12]指出冬小麦根长随土层深度的变化服从指数分布规律。近年的研究证明根系构型（RSA）反映根的空间排列和位置，RSA能够改变其内部或外部连接的数量和细根的根链长度，对土壤中水分具有决定作用，同时对土壤碳产生驱动，在生态系统对环境变化的响应中发挥着关键作用[13-16]。但是，由于黄土区多年生植

收稿日期：2022-07-24； **修订日期：**2022-11-18
基金项目：国家自然科学基金项目（32260422，32060301）；宁夏自然科学基金资助项目（优秀青年项目）（2022AAC05019）；宁夏自然科学基金项目（2021AAC03042）资助
作者简介：于晓燕（1998-），女，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: nxuyuxy@163.com
通讯作者：吕雯（1979-），女，博士，副研究员，主要从事水土保持、水土资源高效利用方面研究. E-mail: lvwen@nxu.edu.cn

物往往根系深达1000 cm以下，研究深层根系及其水分难度极大，所以相关研究报道甚少。柠条锦鸡儿的现有研究多集中于地上部分，对地下部分尤其是地下200 cm深土层范围外根系分布特征、水分有效性等的研究还很不足；同时，对于宁夏南部高密度带状栽培模式下的柠条锦鸡儿林地深层土壤水分、根系特征以及相关性研究也较缺乏。本研究以20 a的人工带状柠条锦鸡儿林地为研究对象，对0~1000 cm土层土壤水分和根系进行调查分析，旨在揭示半干旱区柠条锦鸡儿林深层土壤干化状况、土壤水分利用情况及柠条锦鸡儿根系分布情况，以期为当地植被恢复、土壤水分利用效率及人工植被建设提供科学依据。

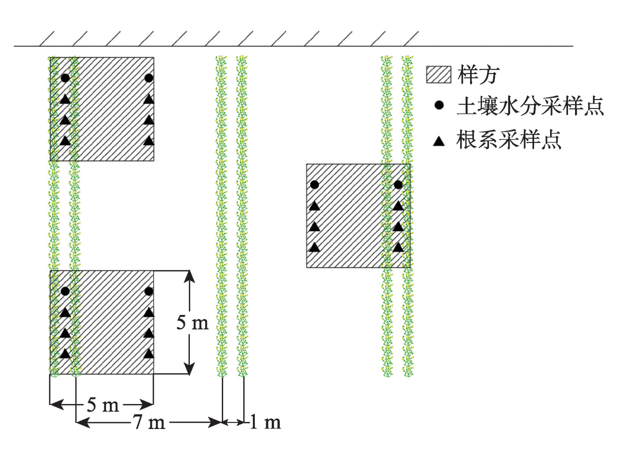
1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于宁夏南部山区固原市彭阳县王洼镇（36°17′25″N，106°39′42″E），多年平均气温8.6 ℃、日照时数2590 h·a^{-1}、年均降水量480 mm·a^{-1}，无霜期150 d·a^{-1}。土壤类型为黄绵土，0~300 cm土壤容重的平均值为1.33 g·cm^{-3}，土壤质地为粉质壤土，粉粒含量、砂粒含量、黏粒含量均值分别为72.69%、18.37%和8.94%[17]，本文凋萎含水量采用Van Genuchten模型拟合，田间持水量实测为19.36%，土壤凋萎系数为7.12%[18]。自然植被类型由灌木草原向典型草原过渡，原生植物多以低矮禾草为主，并伴有少量灌木，人工植被主要有柠条锦鸡儿（*Caragana korshinskii*）、苜蓿（*Medicago sativa*）、山桃（*Amygdalus davidiana*）和樟子松（*Pinus sylvestris*）等[19]。

1.2 研究方法

在试验区坡中长势均一的人工带状柠条锦鸡儿林（20 a）选取样地，并以距样地约120 m的同一高度且坡度相近的旱作农田为对照，农田种植作物为谷子（*Setaria italica*）和玉米（*Zea mays*）。以柠条锦鸡儿带为样方一个边界，设置3个500 cm × 500 cm的样方，重复3次，分别在柠条锦鸡儿林地带内、带间和农田中心位置对土壤水分和柠条锦鸡儿根系取样调查（图1），该区柠条锦鸡儿为2000年4月栽植，株距50 cm，行距100 cm，2行为一带，带间距8 m，柠条锦鸡儿平均高度达1.6 m左右，柠条锦鸡儿林地带间植物群落优势种为禾本科植物大针茅（*Stipa grandis*）等。土壤水分与柠条锦鸡儿根系采样土层深度均为0~1000 cm，每个取样深度间隔为20 cm，取样前一周及采样期间未发生降雨。土壤水分含量采用土钻烘干法测定，于2020年6月26—30日进行了采样。根系调查采用成排根钻取样法（图1），采样时间为2020年7月28日—8月2日，根钻钻头直径为10 cm。采集的根系土样先经过18目网筛冲洗过筛，再利用植物根系进行扫描图像分析（Epson Perfection V750Pro, Epson Inc，中国，北京），用Win-Rhizo软件（版本5.0，Regent Instruments Inc, Quebec, Canada）分析可获得根长、根表面积等参数。



注：取样点位于宽窄行的中间。

图1 研究区样点分布

Fig. 1 Sampling plot distribution in the study area

1.3 各参数计算公式

1.3.1 土壤水分亏缺度 土壤水分亏缺度表示土壤水分对植物生长的亏缺程度。土壤干化状况评价指标参考陈海滨等[20-21]的划分方法，计算公式如下：

$$K = \frac{\theta_a - \theta}{\theta_a} \times 100\% \tag{1}$$

式中：K为土壤水分亏缺度（%），$K<0$时，表示土壤水分不亏缺[17]；θ_a为生长阻滞含水率（%），取田间持水量的60%；θ为土壤实际含水量（%）。将土壤水分亏缺度划分为4个级别：$K\leqslant0$为未亏缺，$0<K\leqslant25\%$为轻度亏缺，$25\%<K\leqslant50\%$为中度亏缺，$K>50\%$为严重亏缺。

1.3.2 土壤水分有效性 土壤水分有效性指实际有效水分与最大有效水分之比，表征植被能够充分利用土壤水分含量的程度。计算公式如下：

$$A_w = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_f - \theta_w} \tag{2}$$

式中：A_w 为土壤水分有效性指数(%)；θ为土壤实际含水量(%)；θ_w为土壤凋萎湿度(%)；θ_f为田间持水量(%)。A_w 值越大，表示土壤水分可被植被吸收利用的程度越大；A_w 值小于0表示土壤水分为无效水，不能被吸收[22]。将土壤水分有效性分为5个等级，见表1。

表1 土壤水分有效性评价指标

Tab. 1 Evaluation index of soil water availability

土壤水分有效性分级	土壤含水量范围	土壤水分有效性/%
富余水	>田间持水量	>19.36
易效水	田间持水量的80%~100%	15.49~19.36
中效水	田间持水量的60%~80%	11.62~15.49
难效水	土壤凋萎湿度~田间持水量的60%	7.12~11.62
无效水	<土壤凋萎湿度	<7.12

1.3.3 土壤干燥化强度 土壤干燥化强度的大小表示土壤干燥化程度，计算公式[23]如下：

$$I_{SD}=\frac{\theta-\theta_w}{\theta_{SS}-\theta_w}\times 100\% \qquad (3)$$

式中：I_{SD} 是土壤干燥化指数(%)；θ_{SS} 是土壤稳定湿度(%)；θ 是实际土壤湿度(%)；θ_w 是土壤凋萎湿度(%)。参考李军等[24]对土壤干燥化程度分级方法，结合本次试验水分数据分布范围，划分为以下4级：$I_{SD}<0$ 为极度干燥化，$0\le I_{SD}<75\%$ 为严重干燥化，$75\%\le I_{SD}<100\%$ 为轻度干燥化，$I_{SD}\ge 100\%$ 为无干燥化。

1.3.4 根长密度

$$\mathrm{RLD}=\frac{\mathrm{RL}}{V} \qquad (4)$$

式中：RLD为根长密度($cm\cdot cm^{-3}$)；RL为根系长度(cm)；V为根钻体积(cm^3)。

1.3.5 根表面积密度

$$\mathrm{RSD}=\frac{\mathrm{RS}}{V} \qquad (5)$$

式中：RSD为根表面积密度($cm^2\cdot cm^{-3}$)；RS为根表面积(cm^2)；V为根钻体积(cm^3)。

1.4 数据分析

利用Mircosoft Excel 2010对土壤含水量、根长密度、根表面积密度等参数进行计算、储存、归纳，使用SPSS 26.0软件对数据计算标准误差和单因素方差分析，利用Origin 2018制图。

2 结果与分析

2.1 柠条锦鸡儿林地垂直剖面水分状况

2.1.1 柠条锦鸡儿林地0~1000 cm垂直剖面水分含量 柠条锦鸡儿林地带内、带间土壤水分含量随土层深度增加出现先减少后增加的趋势(图2)，带间、带内土壤水分含量较农田土壤水分含量降低，带内、带间土壤水分含量在880 cm处出现相交，带间土壤水分含量要优于带内土壤水分含量。0~40 cm土层柠条锦鸡儿林地带间、带内的平均土壤水分含量较农田分别降低27.60%和46.09%；40~280 cm土层带间、带内平均土壤水分含量比农田分别降低14.78%和33.39%，呈剧烈下降趋势；280~440 cm土层带间、带内平均土壤水分含量比农田分别降低47.40%和71.67%，呈逐渐下降趋势；440~800 cm土层带间、带内平均土壤水分含量比农田分别降低63.25%和67.85%，呈摆动趋势；800~1000 cm土层带间、带内平均土壤水分含量比农田分别降低50.58%和52.25%，呈上升趋势。0~1000 cm深度范围内带间、带内平均土壤水分含量分别为7.77%和6.31%。

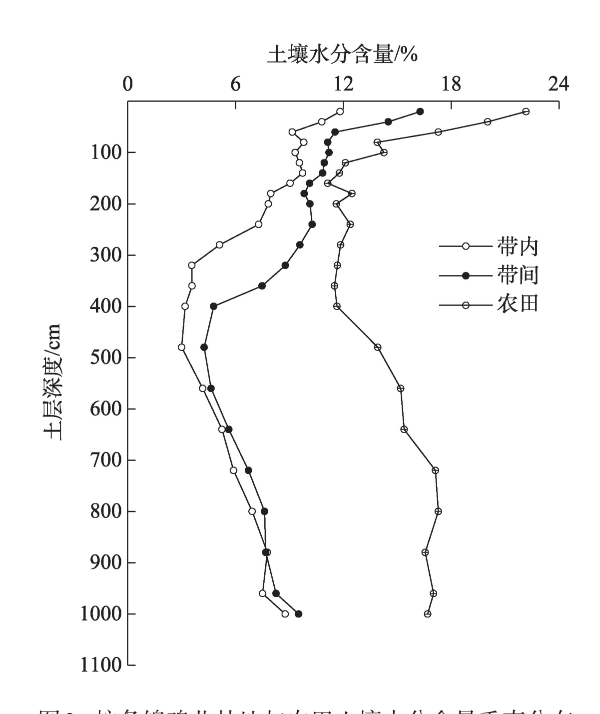


图2 柠条锦鸡儿林地与农田土壤水分含量垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of soil water content in *Caragana korshinskii* forest land and farmland

2.1.2 柠条锦鸡儿林地300~1000 cm垂直剖面水分亏缺度 判断土壤水分状况主要是土壤水分亏缺

程度与剖面分布重要性指标，以附近相似地形的旱作农田作为土壤水分基准量，对柠条锦鸡儿林地土壤水分亏缺指数进行分析。0~300 cm土层水分受降雨和地表植物的影响波动较大，且受降雨已经有所恢复的层次，为消除这些因素造成的表层土壤水分差异性[23]，因此分析300 cm土层深度以下土壤水分亏缺程度。由表2可知，柠条锦鸡儿林地土壤水分亏缺程度随土层深度的增加而减小，其中300~800 cm土层为中度亏缺；800~1000 cm土层为轻度亏缺。300~440 cm、440~800 cm和800~1000 cm土层储水量分别占农田储水量的57.61%、47.10%和60.73%。柠条锦鸡儿林地水分亏缺度在300~1000 cm土层平均为32.76%。农田在300~1000 cm土层无水分亏缺。

表2　300~1000 cm土层柠条锦鸡儿林地与农田的土壤水分亏缺度

Tab. 2　Soil water storage deficit of *Caragana korshinskii* forest and farmland in 300−1000 cm soil layer

土层深度/cm	柠条锦鸡儿林地					农田			
	平均土壤体积含水率/%	水分亏缺度/%	亏缺程度	储水量/mm	占农田储水量/%	平均土壤体积含水率/%	水分亏缺度/%	亏缺程度	储水量/mm
300~440	6.16b	46.79a	中度亏缺	32.79c	57.61	11.67b	−0.84a	无	56.92c
440~800	7.09b	38.72a	中度亏缺	36.38b	47.10	15.83a	−36.86b	无	77.24b
800~1000	10.09a	12.77b	轻度亏缺	48.83a	60.73	16.48a	−42.42b	无	80.40a
平均	7.78	32.76	中度亏缺	39.33	54.99	14.66	−26.71	无	71.52

注：不同小写字母代表不同深度范围差异显著性(P<0.05)。下同。

2.1.3　柠条锦鸡儿林地垂直剖面水分有效性及供水系数　如图3所示，柠条锦鸡儿林地土壤水分有效性等级划分结果为：柠条锦鸡儿林地带内0~240 cm和800~1000 cm深度土壤水分含量为难效水，240~800 cm深度土壤水分含量为无效水。柠条锦鸡儿林地带间0~40 cm深度土壤水分含量为中效水，40~360 cm和720~1000 cm深度土壤水分含量为难效水，360~720 cm深度土壤水分含量为无效水。对照农田土壤水分含量有效性等级划分结果为：0~40 cm深度土壤水分含量为富余水，520~600 cm、640~1000 cm深度土壤水分含量为易效水，40~120 cm、200~320 cm、360~560 cm和600~640 cm深度土壤水分含量为中效水，120~200 cm和320~360 cm深度土壤水分含量为难效水。说明了柠条锦鸡儿林地水分有效性整体偏弱，能够利用水分程度偏低，土壤水分亏损严重。

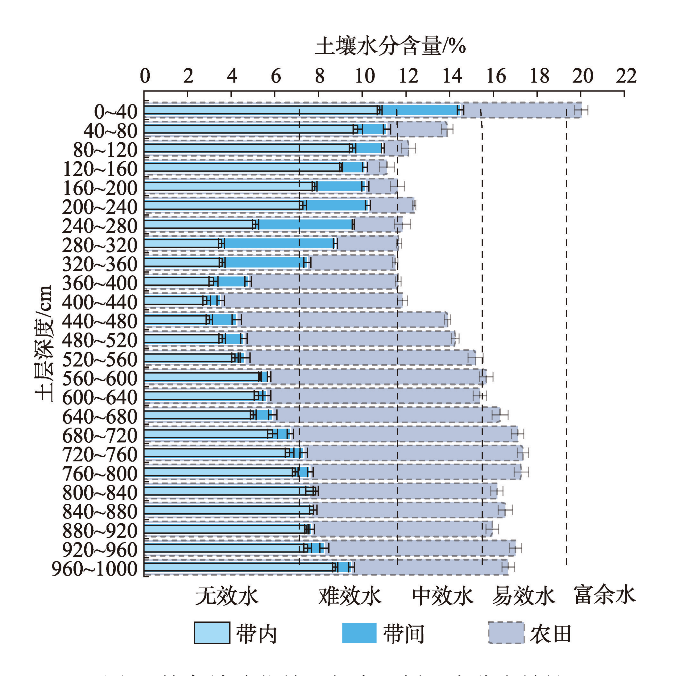


图3　柠条锦鸡儿林地与农田剖面水分有效性

Fig. 3　Soil water availability of vertical profile between *Caragana korshinskii* forest and farmland

研究柠条锦鸡儿林地不同深度土壤水分有效性对带内、带间进行比较(表3)，结果显示柠条锦鸡儿林地带间水分有效性显著大于带内。带间440~840 cm土层土壤水分有效性<0，显著低于0~20 cm

表3　柠条锦鸡儿林地土壤水分有效性与供水系数

Tab. 3　Soil water availability and water supply coefficient in *Caragana korshinskii* forest land

土层深度/cm	土壤水分有效性		土壤供水系数	
	带间	带内	带间	带内
0~80	0.67±0.47a	0.26±0.11a	0.86	0.69
80~200	0.38±0.26ab	0.14±0.07ab	0.75	0.51
200~440	0.02±0.08bc	−0.23±0.08c	0.37	0.03
440~840	−0.12±0.13c	−0.14±0.08c	0.10	0.08
840~1000	0.13±0.09bc	0.06±0.08b	0.38	0.33
平均	0.21	0.02	0.49	0.33

土层土壤水分有效性(P<0.05)；带内200~840 cm土层土壤水分有效性<0，显著低于0~200 cm和840~1000 cm土层土壤水分有效性(P<0.05)。在0~1000 cm土壤不同深度供水系数可知，柠条锦鸡儿林地0~1000 cm带间土壤供水系数大于带内土壤供水系数，带内平均供水系数小于带间平均供水系数，说明了宁夏南部山区带状柠条锦鸡儿林地土壤水分状况带内优于带间。

2.1.4 柠条锦鸡儿林地垂直剖面干燥化程度 柠条锦鸡儿林地带间和带内300~1000 cm各层土壤水分含量均低于稳定水分含量(图4)，出现土壤干化现象。由于降雨入渗对0~300 cm土层影响较大，故表层0~300 cm为土壤水分活跃层。带间、带内平均水分含量分别为6.53%和5.46%，说明了20 a柠条锦鸡儿带间、带内300~1000 cm范围土壤通体出现干层。由表4可知，柠条锦鸡儿林地带间、带内300~1000 cm深度土壤平均干燥化指数分别为−0.13%和−0.37%，属于极度干燥化程度；带间、带内极度干燥层厚度分别为320 cm和500 cm，严重干燥层厚度分别为380 cm和200 cm，未出现轻度干燥和无干燥层。上述表明，柠条锦鸡儿林地可吸收的水分较少，水分不够供给，现有的干层很难恢复。

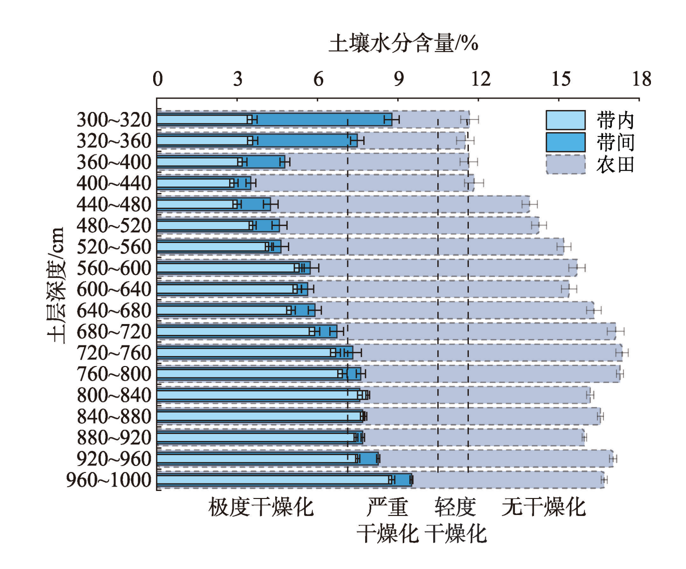


图4 柠条锦鸡儿林地与农田土壤干燥化程度垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of soil drying degree in *Caragana korshinskii* forest and farmland

表4 柠条锦鸡儿林地带内、带间300~1000 cm土层干燥化程度

Tab. 4 Soil drying degree in 300−1000 cm soil layer in the intra-band and inter-band of *Caragana korshinskii* forest

样地	平均干燥化指数/%	土壤干燥强度	极度干燥层/cm	严重干燥层/cm	轻度干燥层/cm	无干燥层/cm	土壤干层/cm
带间	−0.13	极度干燥化	320	380	0	0	700
带内	−0.37	极度干燥化	500	200	0	0	700

2.2 柠条锦鸡儿林地垂直剖面根系分布特征

2.2.1 柠条锦鸡儿林地根干重垂直分布 柠条锦鸡儿林地带间、带内0~1000 cm土层根干重随土层深度增加呈明显的下降趋势(表5)。其中，柠条锦鸡儿林地在0~160 cm土层带内根干重高于带间，160~840 cm相似，带间840 cm以下没有发现根系，带内880 cm、920 cm处发现根系。在柠条锦鸡儿林地带间、带内根干重垂直向下分层特征为，0~80 cm土层中根干重分别为1383.36 g·m^{-3}、1397.19 g·m^{-3}，分别占总根干重的46.33%、45.56%，说明柠条锦鸡儿林地中大部分根系富集于表层0~80 cm土层之中；80~200 cm土层中根干重分别为835.99 g·m^{-3}、871.22 g·m^{-3}，分别占总根干重的28.00%、28.41%；200~440 cm土层中根干重分别为577.23 g·m^{-3}、583.00 g·m^{-3}，分别占总根干重的19.33%、19.01%；440~840 cm土层中根干重分别为189.09 g·m^{-3}、189.43 g·m^{-3}，分别占总根干重的6.34%、6.18%。带间840~1000 cm未观测到根系，带内840~1000 cm总根干重26.00 g·m^{-3}。带间、带内0~1000 cm土层范围内根干重平均值分别为119.43 g·m^{-3}、122.70 g·m^{-3}。带间、带内剖面土壤水分含量与根干重相反，说明根系分布多，根系耗水多，土壤水分含量降低。

表5 柠条锦鸡儿林地根干重

Tab. 5 Root dry weight in *Caragana korshinskii* forest land

土层深度/cm	带间根干重/g·m^{-3}	带间逐层占总根重比例/%	带内根干重/g·m^{-3}	带内逐层占总根重比例/%
0~80	1383.36a	46.33	1397.19a	45.56
80~200	835.99b	28.00	871.22b	28.41
200~440	577.23c	19.33	583.00c	19.01
440~840	189.09d	6.34	189.43d	6.18
840~1000	0.00	0.00	26.00e	0.86
平均值	119.43	–	122.70	–

2.2.2 带状柠条锦鸡儿林地根表面积垂直分布 柠条锦鸡儿林地带内总根表面积密度显著大于带间根表面积密度(P<0.05)(图5)。柠条锦鸡儿林地带内、带间在0~1000 cm土层的根表面积密度分别为0.25~3.55 $cm^2 \cdot cm^{-3}$、0.26~2.51 $cm^2 \cdot cm^{-3}$。柠条锦鸡儿林地带内、带间0~80 cm土层的根表面积密度最大,分别占总根表面积密度的63.51%、66.58%。带内80~200 cm、200~440 cm、440~840 cm、840~1000 cm土层的根表面积密度分别占总根表面积密度的16.46%、6.98%、8.77%和4.47%。带间80~200 cm、200~440 cm、440~840 cm土层的根表面积密度分别占总根表面积密度的17.51%、9.28%、6.90%。带间、带内根表面积密度与土壤水分不一致,带内根表面积密度比带间根表面积密度的土壤水分吸收增加用于自身生长,带内土壤水分明显低于带间土壤水分。

2.2.3 带状柠条锦鸡儿林地根长垂直分布 在带状柠条锦鸡儿林地中,不同土层深度下的根长密度差异显著(图6)。对于带状柠条锦鸡儿林地,带内的总根长密度要显著大于带间的总根长密度(P<0.05)。由图6可知,柠条锦鸡儿林地带内、带间在0~1000 cm土层的根长密度分别为0.05~5.09 $cm \cdot cm^{-3}$、0.14~4.00 $cm \cdot cm^{-3}$。柠条锦鸡儿林地带内、带间0~80 cm土层的根长密度最大,分别占总根长密度的58.45%、59.54%。带内80~200 cm、200~440 cm、440~840 cm、840~1000 cm土层的根长密度分别占总根长密度的16.07%、13.27%、11.01%和1.20%。带间80~200 cm、200~440 cm和440~840 cm土层的根长密度分别占总根长密度的16.37%、13.52%和10.57%。带间根长密度低于带内根长密度,而带间土壤水分高于带内土壤水分。

2.3 各参数相关性分析

将宁夏南部山区雨养带状柠条锦鸡儿林地土层深度、根系各参数与水分各参数作相关性分析(表6)可知,土层深度与根系各参数呈极显著负相

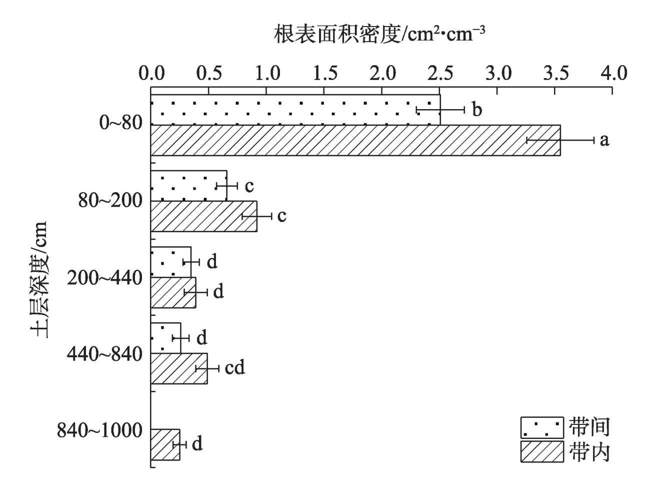


图5 柠条锦鸡儿林地根表面积密度

Fig. 5 Root surface area density in *Caragana korshinskii* forest land

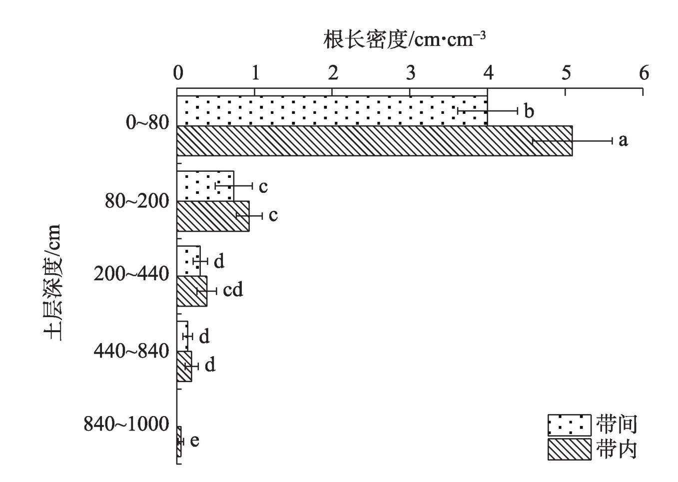


图6 柠条锦鸡儿林地根长密度

Fig. 6 Root length density in *Caragana korshinskii* forest land

表6 根系各参数与水分各参数相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis of root parameters and water parameters

参数	土层深度	根表面积密度	根长密度	根干重	水分含量	干燥化程度	水分有效性	供水系数
土层深度	1.00							
根表面积密度	−0.53**	1.00						
根长密度	−0.51**	0.99**	1.00					
根干重	−0.73**	0.93**	0.90**	1.00				
水分含量	−0.10	0.51**	0.46*	0.60**	1.00			
干燥化程度	−0.10	0.51**	0.46*	0.60**	1.00**	1.00		
水分有效性	−0.10	0.51**	0.46*	0.60**	1.00**	1.00**	1.00	
供水系数	0.01	0.36	0.32	0.46*	0.95**	0.95**	0.95**	1.00

注:*、**分别表示在0.05、0.01水平上显著、极显著相关。

关($P<0.01$)，说明随着土层深度的增加根系逐渐减少。土层深度与水分各参数无显著性关系。根系各参数之间呈极显著相关($P<0.01$)。根表面积密度和根干重与水分含量、干燥化程度和水分有效性呈极显著相关($P<0.01$)，根长密度、根表面积密度与供水系数无显著性，根干重与供水系数显著相关($P<0.05$)。

3 讨 论

黄土丘陵半干旱地区推进人工林草建设工程50多年以来，植被覆盖率得到较大的提高，而作物过度耗水打破了自然降雨与原生植被之间的动态平衡，引发了土壤干层等生态环境问题[25-29]。已有研究[10]表明，黄土高原半干旱区土壤干层厚度可达22.4 m，宁夏南部黄土丘陵区20 a带状柠条锦鸡儿林地干层深度尚不明确。本文在宁夏南部地区20 a柠条锦鸡儿林地中研究发现，在1000 cm土壤深度处柠条锦鸡儿根系未达到最终耗水深度，因此宁夏南部带状柠条锦鸡儿林地土壤干层深度还有待于进一步研究。冯金超等[30]认为，黄土丘陵区半干旱地区降雨能够引发100~300 cm深度土壤入渗响应。本文对宁夏南部山区20 a柠条锦鸡儿林地土壤水分有效性的研究中考虑0~300 cm土层容易受到当年降水的影响出现较大波动性，300 cm以上为活跃层，300 cm以下为稳定层，受降水影响较小。本研究中发现，20 a柠条锦鸡儿林地300~1000 cm土壤水分有效性差，植物供水系数低，说明20 a柠条锦鸡儿林地生长基本很难利用300 cm以下的土壤储存水分。黄土丘陵区独特的地貌地点，地下水补给困难，当地降水可能对300 cm以下土壤干层补给十分有限，导致土壤水库调蓄功能损失严重，这可能是目前植物生长衰败和今后植被重建的关键因素。

黄土高原人工植被下的土壤干层深度是由植物根系吸水不能及时补偿造成的结果，阐明植物根系与土壤的相互作用非常重要。干层深度与植物根系深度一致，柠条锦鸡儿林地带内由于根系分布多，根系吸收水分用于自身生长而导致土壤水分降低，而带间根系分布少、土壤水分较多。柠条锦鸡儿属于深根系植物，已有研究发现陕西省绥德县23 a柠条锦鸡儿根系耗水深度可以达到22.4 m[10]。此次调查宁夏南部20 a柠条锦鸡儿根系深度和土壤干层深度仅限于1000 cm之内，当地带状柠条锦鸡儿根系深层次变化今后还有待于进一步深入研究。0~200 cm土层中，带内、带间根系根干重分别占带内、带间根系总根干重占比较多，说明柠条锦鸡儿根系在土壤中表层分布较多；同时，本文200 cm内采用剖面法，采集到的根系可能不仅指柠条锦鸡儿根系，还可能包括与柠条锦鸡儿共生的其他植物根系。在采样中无法完全区分柠条锦鸡儿根系与其他根系，与其生长环境和生物学特性相关，在柠条锦鸡儿林地随着土壤深度的增加根系数量在逐渐下降，会出现土壤干层深度大于根系深度的现象。可能由于20 a老龄柠条锦鸡儿深层根系消耗土壤水分逐渐向深层延伸对土壤水分消耗还有待研究。由于根系研究的困难较大，目前深层根系研究仍然十分薄弱，尤其是在深厚的黄土区多年生植物根系一般很深，根系对土壤物理性质、土壤养分、水分、碳汇以及微生物等均会产生影响，所以对于黄土区的植物根系的研究应该得到加强。

4 结 论

(1) 20 a柠条锦鸡儿林地带间、带内0~1000 cm范围土壤通体出现干层，土壤水分含量随深度的增加先减小后增加，最后趋于稳定。垂直剖面(0~1000 cm)在440 cm处含量最低；300~1000 cm出现不同程度的水分亏缺；柠条锦鸡儿林地带间、带内0~1000 cm水分有效性差，带间水分有效性优于带内。不同深度土壤供水系数变化规律为带间始终大于带内，且440~800 cm供水系数带间、带内都为0。

(2) 20 a柠条锦鸡儿林地根系现存深度约900 cm，现存根系深度小于干层深度。柠条锦鸡儿林地根长密度在土壤垂直分布形式与根系表面积密度也与根系重量一致。根层主要集中在0~80 cm土层，在0~1000 cm剖面中0~80 cm土层带间、带内根干重分别占46.33%、45.56%，根表面积密度分别占66.58%、63.51%，根长密度分别占59.54%、58.45%。

参考文献(References)

[1] 傅伯杰, 马克明, 周华峰, 等. 黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响[J]. 科学通报, 1998, 43(22): 2444-2448. [Fu Bojie, Ma Keming, Zhou Huafeng, et al. Effects of land use structure on soil nutrient distribution in loess hilly region[J]. Chinese

Science Bulletin, 1998, 43(22): 2444-2448.]

[2] 李保国, 任图生, 张佳宝. 土壤物理学研究的现状、挑战与任务[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 810-816. [Li Baoguo, Ren Tusheng, Zhang Jiabao. Current status, challenges, and missions in soil physics[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 810-816.]

[3] Yang F T, Feng Z M, Wang H M, et al. Deep soil water extraction helps to drought avoidance but shallow soil water uptake during dry season controls the inter-annual variation in tree growth in four subtropical plantations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 234-235: 106-114.

[4] 张毓涛, 胡莎莎, 李吉玫, 等. 新疆3种主要森林类型根系生物量变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 269-276. [Zhang Yutao, Hu Shasha, Li Jimei, et al. Study on root biomass change characteristics of three main forest types in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(2): 269-276.]

[5] 牛海, 李和平, 赵萌莉, 等. 毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 157-163. [Niu Hai, Li Heping, Zhao Mengli, et al. Relationship between soil water content and vertical distribution of root system under different ground water gradients in Maowusu Sandy Land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(2): 157-163.]

[6] 梁海斌, 史建伟, 牛俊杰, 等. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条地土壤水分变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 143-148. [Liang Haibin, Shi Jianwei, Niu Junjie, et al. Study on the characteristics of the soil moisture variation in different-aged *Caragana korshinskii* Kom in loess hilly region, northwestern Shanxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(6): 143-148.]

[7] 刘增文, 王佑民. 人工油松林蒸腾耗水及林地水分动态特征的研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 78-84. [Liu Zengwen, Wang Youmin. Study on transpiration water consumption of artificial *Pinus tabulaeformis* and water dynamic characteristics of forest land[J]. Bulletion of Soil and Water Conservation, 1990, 10(6): 78-84.]

[8] 艾宁, 张智勇, 宗巧鱼, 等. 水蚀风蚀交错区典型人工林土壤水分亏缺特征[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(3): 272-280. [Ai Ning, Zhang Zhiyong, Zong Qiaoyu. Characteristics of soil water deficit in typical forest land in a water-wind erosion crisscross area[J]. Journal of Forest and Environment, 2021, 41(3): 272-280.]

[9] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3060-3068. [Yang Lei, Wei Wei, Mo Baoru, et al. Soil water deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3060-3068.]

[10] 王志强, 刘宝元, 刘刚, 等. 黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 39(9): 1297-1303. [Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Liu Gang, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2009, 39(9): 1297-1303.]

[11] 阿拉木萨, 蒋德明, 裴铁璠. 沙地人工小叶锦鸡儿植被根系分布与土壤水分关系研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 78-81. [Alamusa, Jiang Deming, Pei Tiefan. Relationship between root system distribution and soil moisture of artificial *Caragana icrophylla* vegetation in sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 78-81.]

[12] 张喜英, 袁小良, 韩润娥, 等. 冬小麦根系生长规律及土壤环境条件对其影响的研究[J]. 生态农业研究, 1994, 2(3): 64-70. [Zhang Xiying, Yuan Xiaoliang, Han Run'e, et al. Effects of soil conditions on root growth of winter wheat[J]. Eco-agriculture Research, 1994, 2(3): 64-70.]

[13] Williams A, de Vries F T. Plant root exudation under drought: Implications for ecosystem functioning[J]. The New Phytologist, 2020, 225(5): 1899-1905.

[14] Oppenheimer-Shaanan Y, Jakoby G, Starr M L, et al. A dynamic rhizosphere interplay between tree roots and soil bacteria under drought stress[J]. eLife, 2022, 11: e79679, doi: 10.7554/eLife.79679.

[15] Xie H T, Chen Z M, Feng X X, et al. L-theanine exuded from *Camellia sinensis* roots regulates element cycling in soil by shaping the rhizosphere microbiome assembly[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 837: 155801, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155801.

[16] He W C, Luo C, Wang Y, et al. Response strategies of root system architecture to soil environment: A case study of single-species *Cupressus funebris* plantations[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 822223, doi: 10.3389/fpls.2022.822223.

[17] 包维斌, 王幼奇, 刘鹏, 等. 宁南山区不同土地利用类型下土壤水分分布及其干燥化特征[J]. 草地学报, 2020, 28(3): 775-783. [Bao Weibin, Wang Youqi, Liu Peng, et al. Characteristics of soil desiccation and soil water distribution in different land types in mountaintion area of southern Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(3): 775-783.]

[18] 包维斌, 王幼奇, 刘鹏, 等. 宁南山区不同林龄杏树地土壤干层特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 101-110. [Bao Weibin, Wang Youqi, Liu Peng, et al. Evolution of dry layer of apricot land at different ages in southern Ningxia mountain areas[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(8): 101-110.]

[19] 潘占兵, 李生宝, 蔡进军, 等. 宁南山区苜蓿地土壤水分和养分变异规律研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 61-67. [Pan Zhanbing, Li Shengbao, Cai Jinjun, et al. Variations of soil moisture and nutrients in alfalfa field in southern Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2): 61-67.]

[20] 陈海滨, 刘淑明, 党坤良, 等. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(Ⅱ)——土壤水分有效性及其亏缺状况的分析[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(1): 5-8. [Chen Haibin, Liu Shuming,

Dang Kunliang, et al. A study on forest soil moisture features of gullied loess region of the Loess Plateau: Analyses on the soil moisture availability and deficit state[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(1): 5–8.]

[21] 易亮, 李凯荣, 张冠华, 等. 黄土高原人工林地土壤水分亏缺研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 5–9, 49. [Yi Liang, Li Kairong, Zhang Guanhua, et al. Soil moisture deficit in artificial forest land in Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(5): 5–9, 49.]

[22] 钞锦龙, 胡磊, 雷添杰, 等. 晋陕峡谷河流阶地枣林土壤水分有效性及干燥化分析[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 236–242. [Chao Jinlong, Hu Lei, Lei Tianjie, et al. An analysis on soil moisture availability and dryness of jujube forest in river terrace of Jinshan Valley[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 236–242.]

[23] 张珂萌, 汪星, 汪有科, 等. 典型地面覆盖下黄土丘陵区干化土壤深层水分变化研究[J].农业机械学报, 2022, 53(2): 336–345. [Zhang Kemeng, Wang Xing, Wang Youke, et al. Water variation of deep desiccation soil in loess hilly area under typical mulching [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 336–345.]

[24] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1429–1445. [Li Jun, Chen Bing, Li Xiaofang, et al. Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1429–1445.]

[25] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1–2): 9–17.

[26] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437–448.

[27] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2010, 159(1–2): 99–108.

[28] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2008, 143(1): 91–100.

[29] 孙姗姗, 刘新平, 王翠萍, 等. 半干旱沙地樟子松林降雨再分配特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 109–117. [Sun Shanshan, Liu Xinping, Wang Cuiping, et al. Precipitation redistribution characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in semiarid sandy land [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 109–117.]

[30] 冯金超, 党宏忠, 王檬檬, 等. 晋西黄土区苹果园生长季土壤水分动态[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 139–145. [Feng Jinchao, Dang Hongzhong, Wang Mengmeng, et al. Dynamics of soil moisture in apple orchards in the growing season in the loess region of western Shanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 139–145.]

Deep soil desiccation and root distribution of belted *Caragana korshinskii* forest in loess hilly region

YU Xiaoyan[1], WANG Xing[1], LYU Wen[2,3], GAO Yuankang[1],
WANG Yongqiang[1], WANG Yanchao[1]

(1. School of Agricultural, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. School of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: To explore the deep water status and root distribution of artificial rainfed planting *Caragana korshinskii* forest in southern Ningxia of China, the 20-year rainfed strip planting *C. korshinskii* forest was chosen as the research object, a similar farmland for control was selected, and a 0−1000-cm depth of soil moisture, vertical distribution of root, and correlation were analyzed. Soil moisture and root systems were investigated in the center of the *C. korshinskii* and farmland. The soil drying method was used to determine the soil moisture content, and the root-drill sampling method was used to investigate the root system. The results showed the following: (1) Deep soil desiccation was determined in 0−1000 cm soil layers for the 20-year *C. korshinskii* forest. Soil water content for the interband and intra-band of *C. korshinskii* forest was lower than farmland. Compared with the interband soil water, the intra-band soil moisture content was reduced by 1.46% in the 0−1000 cm soil layer. (2) In the range of 300−1000 cm soil layer, the 20-year artificial *C. korshinskii* appeared in different water deficiency states and soil desiccation. Soil moisture availability for the interband and intra-band were 0.21 and 0.02 and the soil water supply coefficient were 0.49 and 0.33, respectively. (3) *C. korshinskii* roots mainly distributed in the 0−80 cm soil layer, accounting for 46.33% and 45.56% of the total root weight for interband and intra-band dried roots, respectively. The root surface area density accounted for 66.58% (interband) and 63.51% (intra-band) of the total root surface area density, and root length density accounted for 59.54% (interband) and 58.45% (intra-band) of the total root length density. This study has positive significance for in-depth understanding of root systems, water content, and sustainable management of artificial vegetation in semiarid loess areas.

Key words: *Caragana korshinskii* forest; soil moisture availability; soil drying degree; root distribution